

植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討

EFFECT OF VEGETATION ON FLOOD FLOW IN THE ASAHI RIVER

前野詩朗¹, 宮内洋介², 森 卓也³

Shiro MAENO, Yousuke MIYAUCHI and Takuya MORI

¹正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

²正会員 工修 (株) フロントエンド (〒799-0422 伊予三島市中之庄町480-1)

³学生会員 岡山大学 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

Recently, the vegetation and sand bar have been preserved from the viewpoint of maintaining the nature of river. On the other hand, preserved natural environment in the rivers may disturb the flood flow. In the past, most of the vegetation and sand bar had been removed in order to prevent the damage of floods such as the overflow of the bank. Therefore, the control of vegetation and sand bar becomes an important river engineering problem. The purpose of this study is to propose an accurate numerical model which can examine the effect of vegetation and sand bar in the Asahi River. The numerical results compared to high water marks of the flood of typhoon No.10 in 1998 show the usefulness of the presented numerical model.

Key Words: flood flow, vegetation, sand bar, numerical analysis, Asahi River

1. はじめに

平成9年に河川法が改正され, それまでの河川整備の柱であった治水・利水に加えて, 河川環境の整備と保全が加わり, 各地で川の自然を生かした川づくりが進められるようになってきた. 従来より, 河道内の草本・樹木類や低水路内の堆積土砂は, 河道の治水安全度を高めることを目的として一掃されることが多かった. しかし, 河川の自然を保護するといった観点からすると, 河道内の植生などは取り除くのではなく, なるべく残す方がよいことは言うまでもない. このように両立することが困難な事象であるため, 川の植生や土砂を維持管理することは河川工学上大変重要な課題となっている.

岡山市を縦断する旭川においては, 昭和30年代に行われた大規模な浚渫工事以降, 河道内に堆積した土砂が砂州を形成し, 相当量の植生が繁茂するようになった(図-1参照). また, 昭和29年に完成した旭川ダムによる洪水調節効果により, 砂州や植生ををフラッシュするようなインパクト洪水の頻度が少なくなったことも砂州の発達・固定化および樹林化を促進してきた. その結果, 以下で述べる本研究で対象としている区間においても準2次元不等流計算によると一部計画高水流量 $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ を疎通させることができない断面も生じている. 今後, 植生や砂州

をどのように維持管理していくかが重要な課題となっており, 植生や土砂移動を考慮した流況予測モデルを構築することが急がれている. このような背景を考慮して, 本研究は, 旭川の植生や砂州が流れにどのように影響するのかを検討するための基礎段階として, 現在, 中州や植生の管理が問題となっている図-1に示す旭川河口から10.8kmから17.4km区間を対象として精度良い流況予測モデルを構築することを目指す. この区間は図に示すように大きく蛇行した区間を含む上, 多くの堰を含む非常に複雑な地形を有している. また, 旭川の放水路である百間川分流地点(一の荒手)を含むため, 洪水時には常・射流が混在する非常に複雑な流況を呈する区間となっている.

2. 解析の概要

解析対象区間が大きな蛇行区間を含む上, 百間川との分流地点や多くの堰があり, 射流を含む流れも考える必要がある. 解析には, 神田¹⁾らが多自然型護岸周辺流れに適用して良好な結果が得られている一般座標系による長田²⁾,³⁾の手法を適用する. またこの解析法は, 辻本⁴⁾らや清水ら⁵⁾も植生を含む流れに適用して良好な結果を得ている.

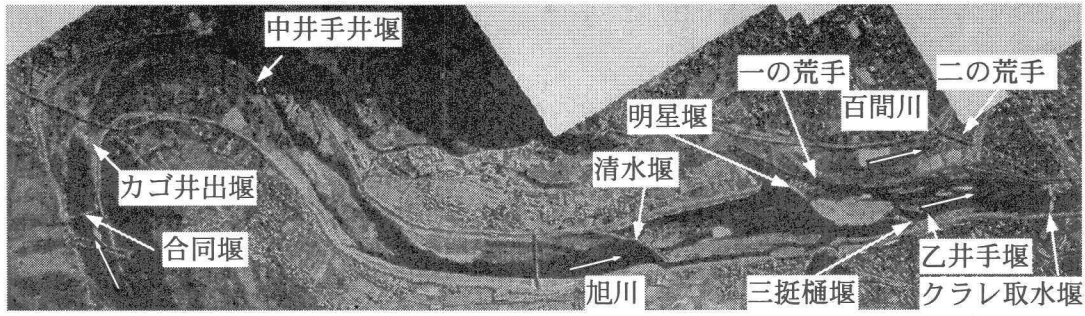


図-1 旭川解析対象区間

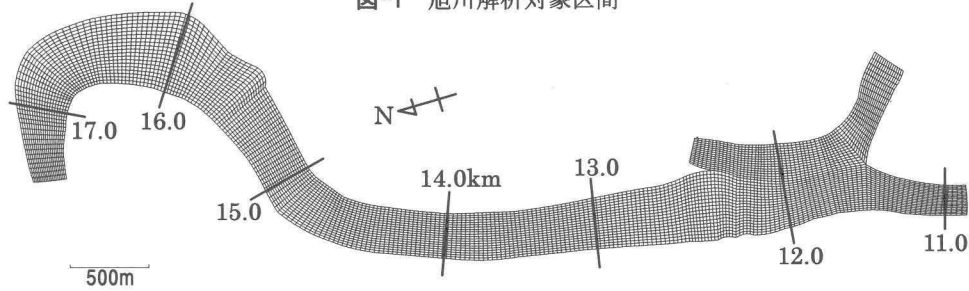


図-2 メッシュ図

2.1 一般座標系による基礎式

流水の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

流砂の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_B}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial (q_{Bx}/J)}{\partial \xi} + \frac{\partial (q_{By}/J)}{\partial \eta} \right\} = 0 \quad (2)$$

ξ, η 方向の運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VM}{J} \right) = \\ -gh \left(\frac{\partial \xi / \partial x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta / \partial x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho J} - \frac{F_\xi}{\rho J} \\ + \frac{\partial \xi / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\partial \xi / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) \\ + \frac{\partial \eta / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\partial \eta / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{N}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UN}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VN}{J} \right) = \\ -gh \left(\frac{\partial \xi / \partial y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta / \partial y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho J} - \frac{F_\eta}{\rho J} \\ + \frac{\partial \xi / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\partial \xi / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ + \frac{\partial \eta / \partial x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\partial \eta / \partial y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 t ：時間、 x, y ：直交座標、 h ：水深、 g ：重力加速度、 M, N ： x, y 方向の流量フラックス、 U, V ：流速ベクトルの反変成分、 ρ ：水の密度、 z_s, z_B ：水位及び河床高、 $\tau_{b\xi}, \tau_{b\eta}$ ：底面せん断応力、 F_ξ, F_η ：植生による抗力、 $-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2}$ ：レイノルズ応力、 J ：座標変換のヤコビアンである。ヤコビアン、流速ベクトルの

反変成分は以下のように定義される。

$$J = 1 / (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \quad (5)$$

$$U = \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v \quad (6)$$

これらの式において、下付き添え字の ξ, η, x, y は偏微分を表している。

水深平均レイノルズ応力は次式で算出する。

$$-\overline{u'^2} = 2D_h (\partial u / \partial x) - (2/3)k \quad (7)$$

$$-\overline{u'v'} = D_h (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) \quad (8)$$

$$-\overline{v'^2} = 2D_h (\partial v / \partial y) - (2/3)k \quad (9)$$

$$D_h = \alpha h u_* \quad (10)$$

ここに、 D_h ：渦動粘性係数、 k ：水深平均乱れエネルギーで Nezu and Nakagawa による鉛直方向の k の分布に関する実験式⁶⁾を適用した。 α ：定数である。

$\tau_{b\xi}, \tau_{b\eta}$ は、粗度係数 n を用いて、

$$\tau_{b\xi} = \xi_x \tau_{bx} + \xi_y \tau_{by}, \quad \tau_{b\eta} = \eta_x \tau_{bx} + \eta_y \tau_{by} \quad (11)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (12)$$

植生の影響は次式で表される抵抗項として基礎式に取り入れた⁴⁾。

$$F_\xi = \xi_x F_x + \xi_y F_y, \quad F_\eta = \eta_x F_x + \eta_y F_y$$

$$F_x = \begin{cases} (1/2) \rho C_d \lambda_{veg} (l/h) h u \sqrt{u^2 + v^2} (h > l) \\ (1/2) \rho C_d \lambda_{veg} h u \sqrt{u^2 + v^2} (h < l) \end{cases} \quad (13)$$

$$F_y = \begin{cases} (1/2) \rho C_d \lambda_{veg} (l/h) h v \sqrt{u^2 + v^2} (h > l) \\ (1/2) \rho C_d \lambda_{veg} h v \sqrt{u^2 + v^2} (h < l) \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 l ：植生の高さ、 C_d ：植生要素の抗力係数、 λ_{veg} ：植生の密生度（流体の単位面積に占める植生の遮蔽面積）である。本研究では植生高さおよび

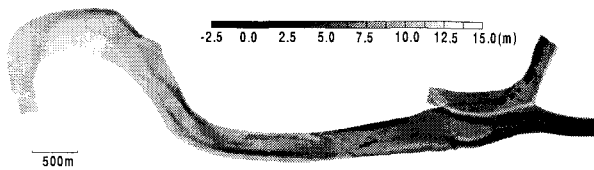


図-3 河床高

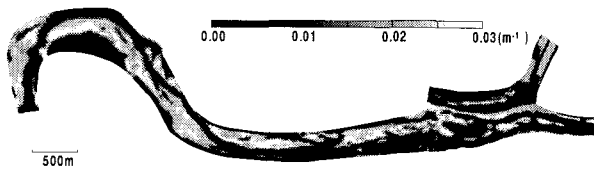


図-4 植生密度

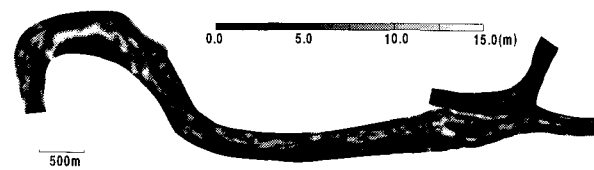


図-5 植生高さ

密度は、資料⁷⁾や現地観測に基づいた値を用いる。また、植生要素の抗力係数 C_d については、多くの場合1.0~1.5程度の値が用いられており、本研究でもこれらに準じて1.0の値を採用する。

掃流砂については神田¹⁾らが多自然型護岸周辺の河床変動計算に適用して良好な結果を得ている、Brownの式(15)を適用し、 x, y 方向成分に変換した。なお、解析区間には多くの固定堰を含むため、堰部分では河床は原河床よりも低下しないものとした。

$$q_B = 10(u_*^2 / (\sigma / \rho - 1)gd)u_*d \quad (15)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度、 σ ：河床材料の密度、 d ：河床材料の粒径である。

基礎式の離散化にはスタッガードスキームの有限体積法を適用し、移流項の差分には風上差分を適用し、その他の差分は中央差分とした。時間方向にはAdams-Bashforth法を適用した。

2.2. 計算条件

(1) メッシュ

図-2は計算に用いたメッシュを示している。旭川については、 x 方向に256断面、 y 方向に21断面、百間川については、 x 方向に61断面、 y 方向に16断面となるようにメッシュを設定した。一つのメッシュの幅は、およそ15~25mである。

(2) 河床条件

河床形状については、平面図および横断図を基に各メッシュごとにデータを入力した、図-3は河床高の分布を示している。中州が発達した部分や滞筋の部分が発達しているのがわかる。

表-1 解析ケース

Case	流量 m^3/s	河床変動	植生の影響	粗度係数
1	100	無	無	0.032
2-0	4405	無	無	※
2-1	4405	無	無	※
2-2	4405	有	無	※
2-3	4405	無	有	※
2-4	4405	有	有	※

※Case1の結果により、0.028、0.032に分類

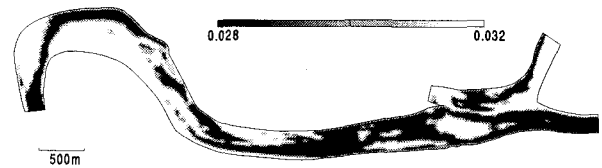


図-6 粗度係数(単位: $s/m^{1/3}$)

(3) 植生分布

植生の分布状態を表すパラメータとして、植生高と密度を用いる。まず、岡山河川事務所から提供して頂いた旭川植生図を基に、植生位置と種類をメッシュごとに入力する。その後、植生の種類に応じて植生高と密度の値を与える。植生高については前述の方法により植生毎に値を与えた。密度については、大きく草本類と木本類の二つに分けて、草本類で $0.02(m^{-1})$ 、木本類で $0.03(m^{-1})$ とした。図-4および図-5は密度と植生高さの分布を示している。これらの図より、砂州にはかなりの植生が繁茂し、十メートル以上にも達する樹木の存在も確認できる。

(4) 解析ケース

旭川における既往2番目の出水である平成10年10月18日に来襲した台風10号による出水 $4405m^3/s$ (浮子による観測値)を解析対象洪水とした。表-1は解析条件を示している。河道の粗度係数は通常低水路と高水敷部分に分けられるが、解析領域には砂州や低水路が複雑に存在するため、その区分が困難である。そこで、本研究では、まず、Case1として解析領域の粗度係数を決定するために、流量が $100m^3/s$ の時の解析を行い、水面が現れる部分の粗度係数を0.028とし、その他の部分を0.032とした。その際、計算開始時から $100m^3/s$ の流量を与えて計算をすすめると初期水位の影響で計算が不安定となったため、上流端流量を $2000m^3/s$ 程度まで増やしてその後、徐々に流量を小さくして $100m^3/s$ になるようにした。図-6はCase1の解析結果により得られた粗度係数の分布を示している。この図より、低水路部分の粗度係数が小さく設定されていることがわかる。

Case2は前述の台風10号洪水を対象にして、植生の有無の影響や河床変動を計算に含めた場合の影響を検討する。Case2-0では、解析区間において4405

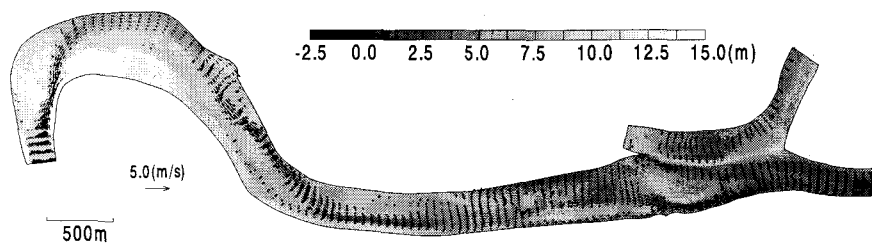


図-7 流速分布・河床高 (Case1)

m^3/s 流れるように助走区間として2時間計算した。Case2-1～Case2-4は、このようにして得られた結果を初期条件として、2時間計算を進める。それぞれ、河床変動、植生の有無による影響を検討するために、それぞれの影響を無視した場合と考慮した場合について解析した。

その他の計算条件としては、計算時間間隔：0.025 s、初期条件として与える水位の流下方向勾配：1/1000、水域、陸域の判定基準水深：0.01 m、河床砂の空隙率：0.4、河床砂の密度： 2.65 g/cm^3 を与えた。

3. 結果および考察

3.1 粗度係数決定のための小流量の解析結果

図-7は、Case1の結果得られた流速分布を河床高とともに示している。この図より、河床の低い低水路部分に沿うように流下し、中州を避けて流下する様子が再現されている。中井手井堰や清水堰などの堰を越える部分では流れが速くなり 2m/s 程度になる。また、斜め堰を越える部分では流向は堰に直角な方向になる。堰上流側では堰上げ効果で流速が小さくなることもわかる。百間川では、水深・流速ともに殆どなく水たまりのような状況となっており、 $100\text{m}^3/\text{s}$ では、旭川から百間川へは分流していない。

3.2 平成10年洪水との比較

(1) 痕跡水位の比較

図-8は、平成10年の台風10号による洪水時の流量 $4405(\text{m}^3/\text{s})$ を想定した解析結果について、洪水後に観測された痕跡水位と比較したものである。それぞれ、植生と河床変動を考慮しない場合と、それぞれ独立に考慮した場合と、両者を考慮した場合である。左岸 $11.6\text{km} \sim 12.4\text{km}$ は旭川と百間川背割堤を越流したため、参考までに百間川左岸水位を記載している。これらの図より以下のことがわかる。

植生と河床変動を考慮しないCase2-1の場合には、 12km 付近より下流については解析値の方が痕跡水位よりも若干大きくなるが、それより上流側の解析区間については痕跡水位よりも低くなる。これは、対象区間に繁茂している相当量の植生の影響を

考慮しなかったため対象区間の粗度を低く見積もったことが原因である。下流端付近の解析値が痕跡水位より上回ったのは、 12km 付近より上流側が流下しやすくなったため、下流端付近のクラレ取水堰で一気に堰き止められるようになったことが原因と考えられる。

Case2-2の河床変動のみを考慮した場合についてみると、右岸上流端付近でかなり河床が変動している。Case2-1の植生と河床変動を考慮していないケースよりも若干水面形が滑らかになっている点を除いて殆ど差は見られない。

Case2-3の植生のみを考慮したケースについて見ると、解析結果得られた水位は、上流端付近の一部を除いて痕跡水位を上回ることがわかる。これは、植生の流水抵抗が洪水の流れを阻害して、水位を上げたことが原因である。痕跡結果より解析水位が上回った原因としては、洪水時における植生の倒伏などを考慮していない点や植生密度条件がやや大きかった点などが挙げられる。

河床変動と植生の両者を考慮したCase2-4について見ると、Case2-3と同様に解析値は痕跡水位を上回っている。砂州が発達・固定化し、 14km より上流側には砂州や植生の影響により旭川の計画高水流量 $6000\text{m}^3/\text{s}$ を流下させることのできない断面もあり、その付近での植生による水位上昇が著しい。前述のように、植生を考慮せず河床変動のみを考慮したCase2-2の場合には、河床変動を考慮しないCase2-1の場合よりも水面形は多少滑らかになったが、植生のみを考慮して河床変動を考慮しなかったCase2-3と比較すると、水面形が滑らかになっている点は見られない。これは、植生による抵抗により、砂州上の流速が減少し、砂州における河床変動が抑制されたことが原因であると推定される。

(2) 百間川への分流量の検討

解析対象洪水の旭川本川のピーク流量は解析区間上流端付近の基準点下牧で10月18日の午前4時頃 $4405\text{m}^3/\text{s}$ であった。また、百間川のピーク流量は百間川下流端より下流側の地点で午前6時頃 $874\text{m}^3/\text{s}$ であった。この時刻の旭川本川流量は下牧で約 $4000\text{m}^3/\text{s}$ 前後である。また、洪水時に一の荒手上流側の土手が崩壊し百間川に流れ込んでいる。このように、今回の解析結果を用いて実際の洪水時の分流

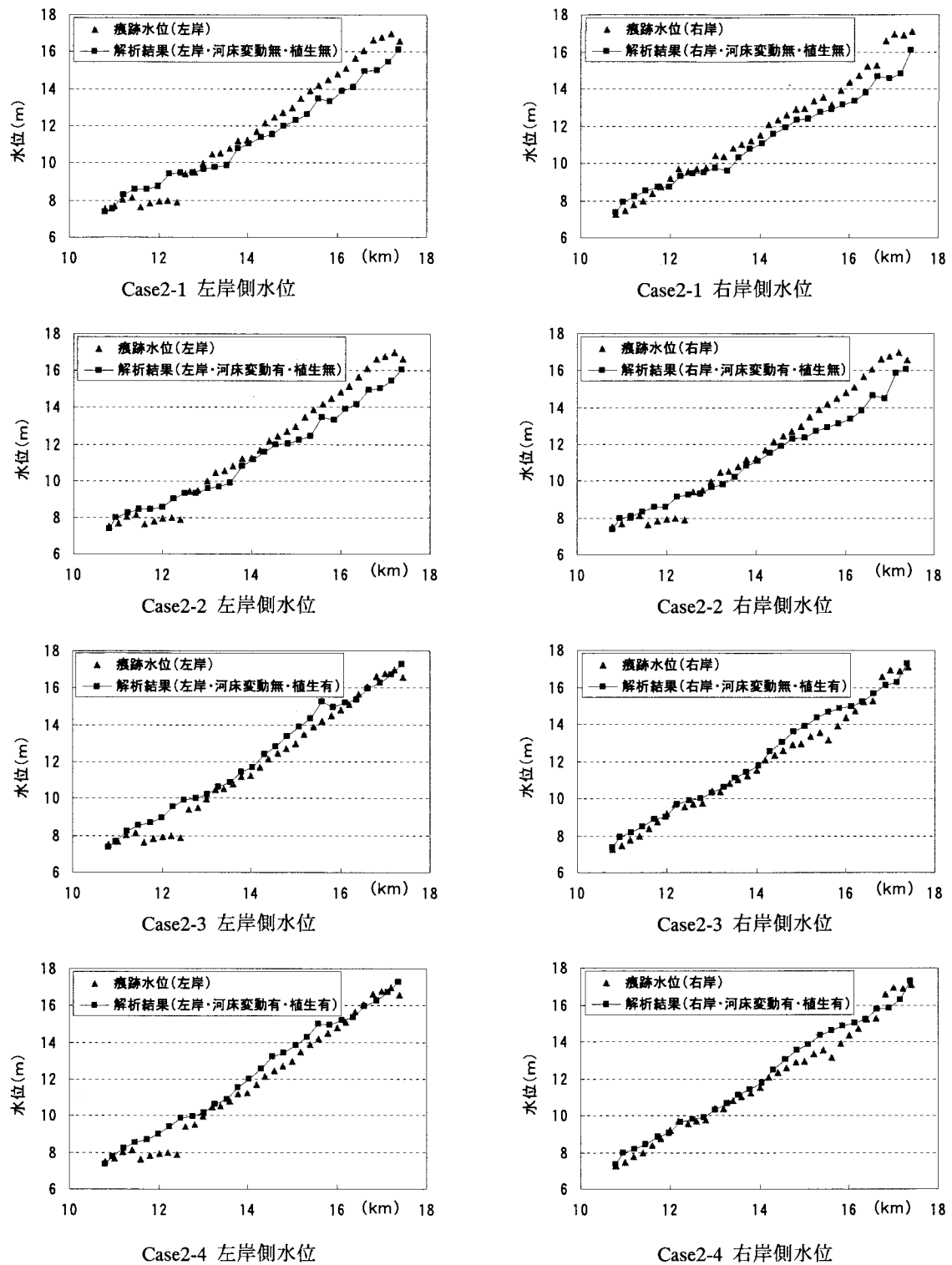


図-8 解析結果と痕跡水位の比較

量について比較検討することは困難であるが、ここでは解析結果より得られる分流量を比較することにより、分流量に与える植生などの影響を検討する。図-9は解析結果から得られた旭川と百間川の分流量を示している。この図より、Case2-1の植生も河床変動も考慮していないケースでは分流量は $500\text{m}^3/\text{s}$ となり、観測値よりもかなり小さくなることがわかる。これは、河床変動や植生の抵抗を考慮していないため、百間川分流地点における本川側の水位が低

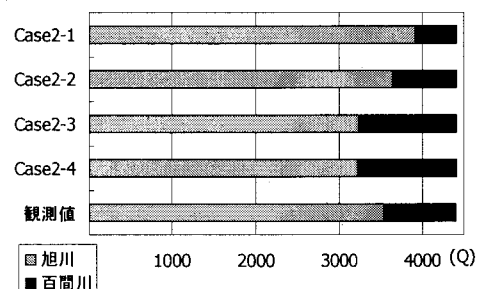


図-9 旭川と百間川の流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$

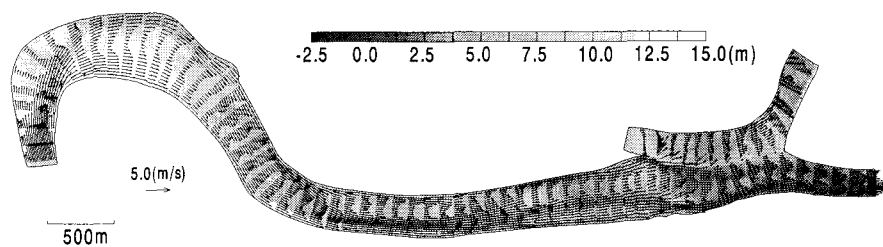


図-10 流速分布・河床高 (Case2-4)

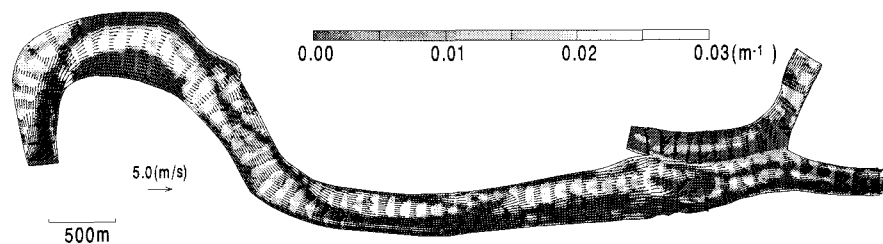


図-11 流速分布・植生密度 (Case2-4)

くなり、分流量が少なくなったためである。次に、Case2-2の河床変動のみを考慮すると、分流量が増加することがわかる。これは、分流地点より下流側に位置する大きな中州への土砂堆積が原因ではないかと考えられる。植生のみの影響を考慮したCase2-3では植生の抵抗により分流地点の水位が上昇し百間川への分流量がかなり増加している。分流量は計測値よりも200 m³/s 多くなる。これは、植生による抵抗を実際よりもやや大きく見積もったことが原因であろう。植生と河床変動の両者を考慮したCase2-4は、Case2-3とほぼ同程度の分流量にとどまっている。このことより、河床変動と植生の両者とも分流に影響するが、植生がある場合には河床変動による分流量への影響は殆どなくなることがわかる。

(3) 流速分布

図-10, 11は、植生と河床変動の影響を考慮したCase2-4の流速分布について、それぞれ河床高と植生密度とともに図示している。図-10より、主流は低水路部分に沿うように流下していることがわかる。また、堰を越える部分で流れが速くなり、とくに、百間川分流地点である一の荒手付近の流速はかなり大きくなる。図-11より、植生が繁茂している部分では流速が小さくなることがわかる。とくに、16km付近の大曲の水路中央部分の高い樹木が存在している箇所ではかなり流速が小さくなっている。

5. 結論

本研究では、旭川の植生や砂州が流れに及ぼす影響を平成10年の台風10号洪水を対象として検討した。検討に際しては、旭川に繁茂している植生を河川植生図よりデータとして取り入れ平面2次元解析

を行った。その結果、植生や河床変動が洪水時の流れに影響し、とくに、植生が旭川の水位を高め、旭川の放水路である百間川への分流にかなり影響することが明らかにされた。今後は、植生の種類による流水抵抗の検討や、洪水時の植生の倒伏、さらに分流地点のメッシュの細分化などすることにより、さらに精度良いモデルの構築を目指す予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所より関係する資料を提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 神田佳一，福井奈美子，福岡涼子：多自然型護岸を有する低水路狭窄部の河床変動に関する研究，明石高専紀要，第44号，pp.63-69, 2001.
- 2) 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義集，pp.61-76, 1999.
- 3) 長田信寿：水理公式集 例題プログラム集 平成13年度版，土木学会，2001.
- 4) 辻本哲郎，寺本敦子：砂州河川における一時水域「たまり」の形成シナリオ，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.83-88, 2000.
- 5) 清水義彦，小葉竹重機，新船隆行：樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算，水工学論文集，第44巻，pp.819-824, 2000.
- 6) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, pp.53-56, 1993.
- 7) 奥田重俊：生育環境別 日本野生植物館，WILD PLANTS OF JAPAN, 小学館，1997.

(2003年9月30日受付)